جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و یکم، پاییز ۱۳۹۸

صص ۲۰۳- ۱۸۵

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81921

ارزیابی و عدم قطعیت آسیب‌پذیری شهرها ناشی از زلزله با مدل FAHP (نمونه موردی: شهر سنندج)

پیمان یاریان- کارشناس ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلام واحد ممقان، آذربایجان شرقی، ایران

محمدرضا کرمی[1]- استادیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/٤/۲٤ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/٦/۲٦

چکیده

زلزله یک تهدید جدی برای جوامع بشری محسوب می‌شود. علاوه بر شرایط زمین‌شناسی و نوع گسل، عوامل مختلف محیطی، کالبدی و اجتماعی در تشدید میزان آسیب‌پذیری ناشی از آن تأثیر خواهند گذاشت. کشور ایران ازجمله زلزله‌خیزترین کشورهای دنیا به‌حساب می‌آید و تاکنون تلفات زیاد مالی و جانی متوجه بسیاری از استان‌ها و شهرهای آن شده است. شهر سنندج نیز به‌عنوان مرکز استان کردستان در غرب کشور به دلیل وجود گسل‌های مریوان – سیرجان، زاگرس، تراکم بالای جمعیت و... (عوامل طبیعی و انسانی) دارای شرایط نامساعدی است. به همین دلیل ارزیابی خطر ازجمله برنامه‌های مهم در مدیریت پیش از بحران به‌حساب می‌آید. در فرایند ارزیابی خطر، انتخاب فاکتورها و معیارهایی که بیشترین میزان تأثیر در تشدید یا کاهش آسیب رادارند امری مهم و تخصصی محسوب می‌شود. هدف این پژوهش ارزیابی آسیب‌پذیری شهر سنندج در برابر زلزله است که با انتخاب ۱۳ لایه از معیارهای طبیعی، کالبدی و اجتماعی و انتخاب اوزان لایه‌ها برمبنای پژوهش‌های و منابع سابق با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و IDRISI اقدام به ارزیابی نقشه خطر از طریق مدل FAHP گردید. با توجه به نتایج حاصل، مدل ترکیبی Fuzzy-AHP به‌عنوان مدل بهینه شناخته شد؛ و خروجی به‌صورت نقشه و درصد آسیب‌پذیری هر طیف استخراج گردید. نتایج حاصل حاکی از آسیب‌پذیری بالا در مناطق ۱ و ۲ شهر سنندج ازجمله محلات قطارچیان، گلشن، بعثت، تازه‌آباد، جورآباد، تپه شیخ صادق و عباس‌آباد و در منطقه ۳ کلکه جار، مبارک‌آباد، ویلاشهر و شهرک بهاران است که آسیب‌پذیری در مناطق جنوبی شهر ناشی از شرایط محیطی و در مناطق شمالی بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های کالبدی و اجتماعی است.

کلیدواژه‌ها: عدم قطعیت، ارزیابی خطر زلزله، منطق فازی- ای اچ پی (Fuzzy-AHP)، مدل‌سازی، شهر سنندج.

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۸۳۷٦٤۹۷٦

Email: karami_mohammadreza@ymail.com

۱- مقدمه

طبق پیش‌بینی‌های به‌عمل‌آمده برآورد می‌شـود در سـال ۲۰۲۵ حدود ٦٥ درصـد از مردم دنیا جهت سـکونت به شـهرها روی‌آورند (Fengli et al,2005) و ازجمله حوادثی که گریبان گیر شـهرها و کاربری‌های شهری است حوادث طبیعی اسـت (Alexander,2002:38). این مخاطرات می‌تواند در صـورت عدم وجود برنامه و سـیسـتم‌های تقلیل و پیشـگیرانه به فجایعی هولناک تبدیل شـوند (ملکی و همکاران،۱۳۹٦). این‌گونه از حوادث مزید بر عواقب و پیامدهای زیان‌بار مالی و تلفات انسـانی وسـیع، دارای عواقب و اثرات روانی برای بازماندگان از حادثه خواهد داشـت (مهدوی، هزاریان، ۱۳۹٦). بلایای طبیعی همچون زلزله ازجمله تهدیدات همیشـگی و جدی برای انسـان و سکونتگاه‌های انسانی بوده‌انـد که در مناطق با لرزه‌خیزی بالا موجب به خطر افتادن حیات بشـر گردیده اسـت (محمدی و جاوید،۱۳۹٥). امروزه باوجود پیشـرفت‌های تکنولوژیکی و افزایش دانش و توانایی انسـان در کنترل بلایای طبیعی، شـهرها هنوز هم با خطر زلزله مواجه هسـتند و از این منظر آسـیب‌پذیرند (مهدوی نژاد و جوانرودی،۱۳۹۱). به‌طوری‌که در سـال ۲۰۰۱ به‌عنوان مرگبارترین سـانحه در جهان از آن نام‌برده شـده اسـت که کشـور ایران نیز ازجمله کشورهای زلزله‌خیز در دنیا اسـت و براثر وقوع این حادثه ناگوار متوجه تلفات بسـیار سـنگین جانی و مالی در شـهرهایش بوده اسـت (کرمی و امیریان،۱۳۹۷). در قرن بیسـتم ۱۱۰۰ زلزله مخرب در نقاط مختلف کره زمین روی‌داده که در اثر آن بیش از ۱٥۰۰۰۰۰ نفر جان خود را ازدسـت‌داده‌اند. (Lantada.N et al,2008)؛ بنابراین ارزیابی آسـیب‌پذیری ناشـی از این حادثه طبیعی به‌منظور بهینه‌سـازی و مدیریت شـهری باهدف کاهش تلفات و خسـارات در شهرهایی که بیشتر در معرض این خطر قرار دارند امری ضـروری تلقی می‌گردد (Ericson,2005). با توجه به مطالعات و شـواهد موجود در این زمینه می‌توان گفت که در اغلب کشـورهای درحال‌توسـعه به دلیل عدم آمادگی و نبود برنامه‌های مؤثر پیشـگیرانه، رخداد این‌گونه بلایای طبیعی موجب بروز بحران خواهد شـد (Alexander,1993). توجه به این نکته حائز اهمیت اسـت که نمی‌توان مانع از وقوع زلزله یا هر فاجعه طبیعی شـد ولی می‌توان با بالا بردن ضـریب امنیت و آمادگی لازم قبل از بروز رخداد از میزان تلفات و خسـارات ناشی از جلوگیری نمود (Lewis,1981). کشور ایران در مرکز آخرین کمربند کوهزایی کره‌ی زمین قرار دارد که پوسـته زمین در آن آرام نگرفته اسـت (زمردیان،۱۳۸۱). در ایران حدود ۸۰ درصد از تلفات جانی در اثر زلزله در آن رخ‌داده اسـت که طبق آمار حدود ۱۸ درصـد از زلزله‌های مخرب رخ‌داده در دنیا به کشور ما تعلق دارد (غلامی و همکاران،۱۳۹٤). همچنین بر اسـاس آمارهای رسـمی هر ۱۰ سـال یک‌بار زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۷ ریشـتر و هرسـال زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ٦ ریشـتر و ۱۰ زلزله با بزرگی ٥ ریشـتر در کشـور ایران روی خواهد داد (آبسـالان و کنگی،۱۳۹۳) که این امر موجب شـده در طول ۲٥ سال گذشته تاکنون حدود ٦ درصد از مرگ‌ومیرهای جانی در ایران براثر وقوع زمین‌لرزه باشـد (خاکپور و همکاران،۱۳۹۲). مشـکلات اقتصـادی و اجتماعی نیز علاوه بر عوامل طبیعی باعث شـده اسـت که میزان آسـیب‌پذیری در برابر زلزله در این کشـور رشد روزافزونی داشته باشد، به‌نحوی‌که حدود

۳۲ درصـد از حجم مسـاحت و حدود ۷۰ درصد از جمعیت در ایران در حوزه‌های لرزه‌خیز قرار دارند (WDI,2004). به دلیل اینکه مراکز زمین‌لرزه موجود در ایران بسـیار کم‌عمق اسـت به همین دلیل زلزله‌های رخ‌داده در ایران مخرب و آسـیب‌زا بوده و با توجه به طول گسـل‌های فعال کشور و منطقه احتیاط آن‌ها (۲۰ کیلومتر اطراف گسل)، ۳۵ درصد از خاک ایران با خطر زمین‌لرزه مواجه اسـت (نگارش،۱۳۸٤) همچنین بر اسـاس مطالعات وزارت راه و شـهرسـازی در طرح کالبد ملی، ۵۰ درصـد جمعیت شـهرنشین کشور در پهنه‌هایی سکونت دارند که بیشترین خطر لرزه‌خیزی آن‌ها را تهدید می‌نماید شـهر سـنندج در زون سـاختاری نسـبتاً آرام سـنندج -سیرجان قرار دارد، ولی با توجه به عبور دو گسل معروف زاگرس جوان و گسـل مریوان – سـیرجان در معرض زلزله‌های اطراف نیز قرار دارد (کرمی و نیری،۱۳۹۵) که بر پایه مطالعات قبادی و همکاران (۱۳۹۰) بزرگی زلزله ناشـی از فعالیت این گسـل‌ها در اطراف سنندج به ٦/۱ تا ٦/۹ در ریشـتر خواهد رسـید و در عمق ۱۵–۲۵ کیلومتر اتفاق خواهد افتاد. ناحیه زاگرس ازجمله لرزه‌خیزترین نقاط کشـور محسـوب خواهد شد که بر پایه‌ی تحقیقات صورت گرفته رشته‌کوه زاگرس دارای گسل‌های زیادی است (Amiri G G. et al,2009). ویژگی‌های اقتصـادی، فرهنگی، اجتماعی و سـیاسـی شهری بزرگ همچون سنندج سبب می‌شود که وقوع هرگونـه زمین‌لرزه در این شـهر بر کـل کشـور اثرات منفی و جبران‌نـاپـذیری بگـذارد، بنابراین ارزیابی میزان آسـیب‌پذیری ناشـی از زلزله باوجود گسـل‌های مروارید، سـرتخت، پیرانشـهر، دینور زاگرس لازم و ضـروری اسـت (Kaveh A,2007) کـه چنین ویژگی‌هـایی از لرزه‌خیز بودن بـالا در این شـهر حکایت می‌کند و بر مبنای تحقیقات کایوشـه و متشـرعی (۱۳۹۲) نواحی شـرقی شـهر سـنندج نسـبت به سـایر مناطق دیگر خطرزا اسـت. علاوه بر این قسـمت‌های زیادی از شـهر سـنندج دارای بافت فرسـوده و سـکونتگاه‌های فاقد اصول ایمنی است. از دیگر تحقیقات انجام‌شـده در راسـتای پهنه‌بندی و ارزیابی آسـیب‌پذیری شـهر سـنندج ناشـی از زلزله می‌توان به پژوهش خالق پناه و همکاران (۱۳۹٤) با موضـوع پهنه‌بندی میزان آسـیب‌پذیری شـهر سـنندج ناشـی از زلزله با اسـتفاده از دو مدل تحلیل سـلسـله مراتبی و مدل تاپسـیس اشـاره نمود که نتایج تحقیق آن‌ها از پتانسیل بالای آسیب‌پذیری در شمال شهر سنندج اشـاره دارد. ملکی (۱۳۸۵) و شـهابی و همکاران (۱۳۸۹) به پهنه‌بندی خطر زلزله در اسـتان کردستان پرداختند که نتایج تحقیق آن‌ها نشـان می‌دهد شـهر سـنندج در موقعیت با خطر نسـبی متوسـط قرار دارد. همچنین حبیبی و جوانمردی (۱۳۹۱) در پژوهشـی دیگر با بهره‌گیری از مدل AHP به ارزیابی خطر هسـته مرکزی سنندج پرداختند که نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از آسـیب‌پذیری بالا در محدوده ذکرشـده اسـت. در ایران نیز از مهم‌ترین پژوهش‌های صـورت گرفته درزمینهٔ ارزیابی آسـیب‌پذیری شـهری در برابر زلزله می‌توان به تحقیقات ولی زاده (۱۳۸۰)، فرج زاده و بصـیرت (۱۳۸۵)، شـیعه و همکاران (۱۳۸۹)، قنبری و همکاران (۱۳۹۲)، کریمی و همکاران (۱۳۹۲)، ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۳۹۳)، علوی و همکاران (۱۳۹٤)، روسـتایی و معبودی (۱۳۹۵)، بهزاد افشـار و اکبری (۱۳۹٦) و امیریان و کرمی (۱۳۹۷)، اشـاره نمود که با اسـتفاده از معیارهای طبیعی و کالبدی اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی آسـیب‌پذیری ناشـی از

زلزله نموده‌اند. در مقالات و تحقیقات از مدل‌ها و متغیرهای مختلفی استفاده‌شده که بر اساس بررسی‌های انجام‌شده برای پژوهش حاضر باهدف ارزیابی آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله با تأکید بر رویکرد عدم قطعیت، ۳ شاخص به همراه ۱۳ معیار در قالب شاخص‌های کالبدی، اجتماعی و طبیعی انتخاب شدند گزینش معیارها بر اساس مطالعات و پژوهش‌های سابق بوده و سعی بر آن بوده متغیرهایی که بیشترین ارتباط و تأثیر را داشته‌اند انتخاب و در مدل‌های موردنظر (FAHP –AHP) اجرا شوند (شکل شماره ۱).

۲- منطقه مورد مطالعه

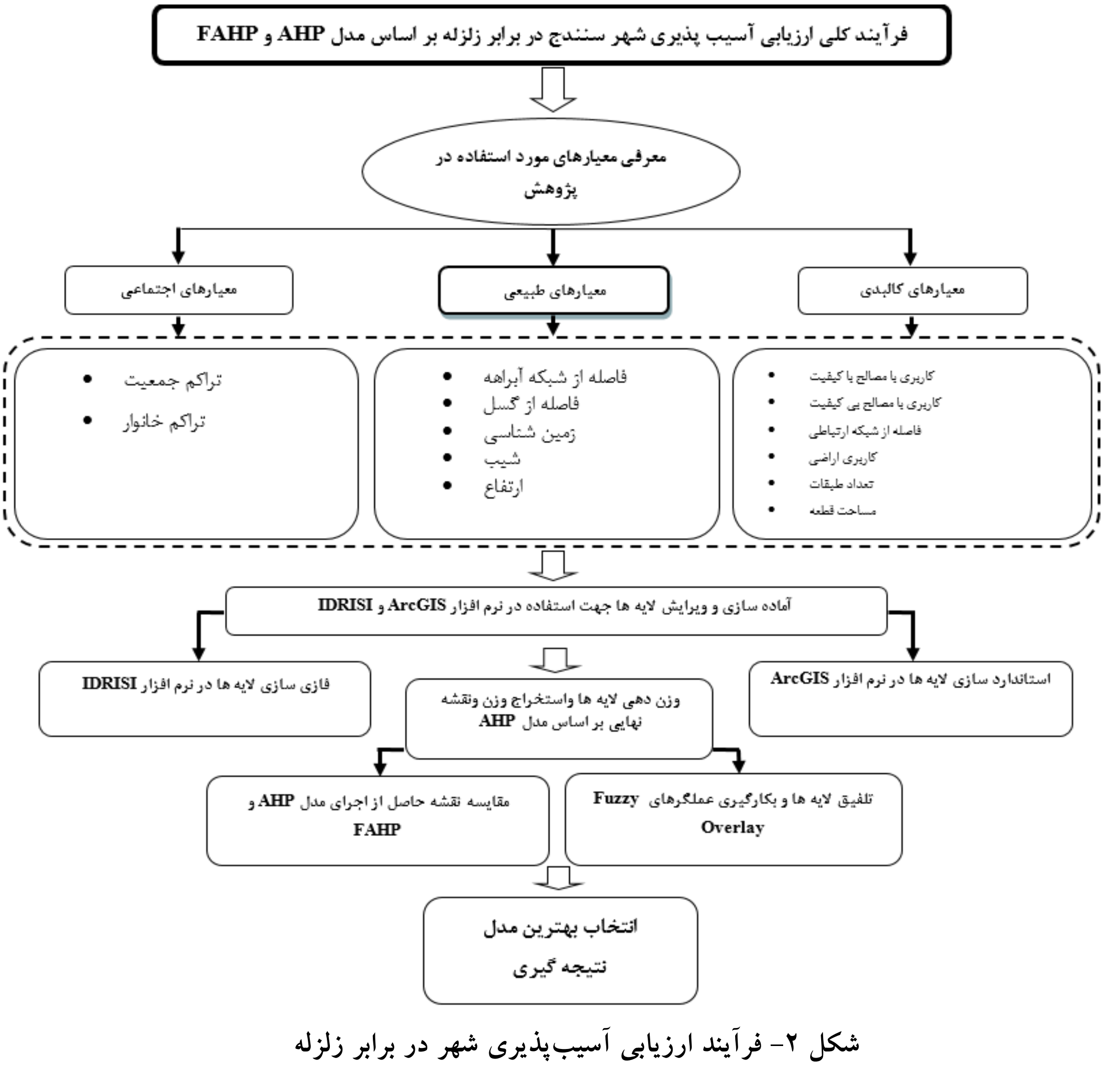
محدوده موردمطالعه، شهر سنندج می‌باشد که مرکز استان کردستان است که در موقعیت طول ٤٤ درجه و ٥٥ دقیقه تا ٤٧ درجه و ٥ دقیق شرقی و عرض ۳۵ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی و در غرب ایران واقع‌شده است که مساحتی معادل ۲۹۰٦/۰٤ کیلومترمربع در حدود ۱۰,۳ درصد از وسعت استان کردستان را شامل می‌شود (نیری و کرمی،۱۳۹۵). بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای جمعیت ٤١٤٠٦٩ نفر است. این شهر دارای بافت تاریخی فرهنگی با وسعت ۱۱۲ هکتار است که همان بافت فرسوده و قدیمی شهر است. شهر سنندج از منظر ویژگی طبیعی بین کوه‌های و تپه‌های (آبیدر، کوچکه رش و توش نوذر) که ازجمله جبال زاگرس هستند محصورشده است که ارتفاع تپه‌های داخل شهر باعث شده تا فقط ۸۱ درصد از محیط شهر جهت توسعه مفید باشد (انتظاری نجف‌آبادی و همکاران،۱۳۹۲). با توجه به نقشه گسل‌های فعال ایران تهیه‌شده توسط حسامی و همکاران (۱۳۸۲) بر اساس نظر پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی، شهر سنندج در زون ساختاری نسبتاً آرام سنندج -سیرجان واقع‌شده است، اما با توجه به عبور دو گسل معروف زاگرس جوان و گسل مریوان - سیرجان در معرض زلزله‌های اطراف قرار دارد. همچنین گسل‌های (مروارید، سرتخت، پیرانشهر، دینور، صحنه، نهاوند، زاگرس، گارون و تخت سلیمان) در شعاع ۱۵۰ کیلومتری این شهر قرار دارند که بر اساس مطالعات خاجی و همکاران (۱۳۹٤) حدود ۱۲۰ زلزله با بزرگی بین ٤ الی ۷ ریشتر از سال ۱۹۰۰ الی ۲۰۱۳ در ۱۵۰ کیلومتری سنندج به وقوع پیوسته است (خاجی و همکاران،۱۳۹٤).



شکل ۱- موقعیت شهر سنندج در تقسیمات کشوری و استانی

۳- مواد و روشها

پژوهش حاضر از بعد ماهیت، جنبه‌ی کاربردی و از بعد شیوه تحقیق به‌صورت ترکیبی مبتنی بر روش‌های توصیفی و کمی است که در اینجا با بهره‌گیری از دو مدل ریاضی AHP و FAHP باهدف ارزیابی آسیب‌پذیری کاربری‌های شهر سنندج مورداستفاده قرارگرفته است. با توجه به اینکه فرآیند برنامه‌ریزی شهری دارای سه رکن اصلی شناخت وضع موجود، تجزیه‌وتحلیل و تدوین برنامه است (شیعه،۱۳۸۵) به همین دلیل با استفاده از ترکیب معیارهای مختلف با یکدیگر وانجام تجزیه‌وتحلیل‌های خاص و بومی ساختن آن برای منطقه موردمطالعه بتوان نقشه پهنه‌بندی خطر را تهیه نمود.



شکل ۲- فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری شهر در برابر زلزله

از معیارهای مورداستفاده جهت ارزیابی، معیارهای طبیعی (شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، زمین‌شناسی، آب‌های سطحی و زیرزمینی) می‌باشد که بیشتر محققین از اسمیت (1992) و نگارش (۱۳۸۲)، کرمی ونیری (۱۳۹۵)، کریمی کردآبادی و نجفی (۱۳۹٤)، شهین فر (۱۳۹۳)، جهت آسیب‌پذیری طبیعی از آن استفاده نموده‌اند. معیارهای کالبدی مورداستفاده جهت ارزیابی ازجمله: کاربری اراضی، مساحت قطعه، تعداد کاربری دارای مصالح باکیفیت در هکتار، تعداد کاربری دارای مصالح بی‌کیفیت در هکتار، تعداد طبقات، شبکه‌های ارتباطی و...) در این پژوهش مورداستفاده قرارگرفته که توسط، احمدیانی و همکاران (۱۳۹٤)، احدنژادروشتی و همکاران (۱۳۹٤)، روستایی و همکاران (۱۳۹۵)، نیز از آن استفاده نموده‌اند. همچنین معیارهای اجتماعی استفاده‌شده تراکم جمعیت و بعدخانوار می‌باشد که لی (۲۰۰۸)، قنبری و همکاران (۱۳۹۳)، محمدی و همکاران (۱۳۹۵) و... نیز جهت پهنه‌بندی و ارزیابی آن را تجزیه‌وتحلیل نموده‌اند. روش AHP ابتدا توسط Thomas L. Saaty پیشنهادشده است و در طول بیش از ۲۰ سال، این رویکرد به‌طور گسترده در مواردی مختلف همچون برنامه‌ریزی، جایگزینی، بهینه‌سازی، تخصیص منابع و حل منازعات و... به‌ویژه برای تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره (MCDM) مورداستفاده قرارگرفته است (Ming-Ian Lin et al, 2011)، این تکنیک تصمیم‌گیری منعکس‌کننده رفتار طبیعی و تفکر انسان است که مطالعه مشکلات پیچیده بر اساس اثر متقابل آن‌ها می‌باشد و به‌طور ساده‌ای آن‌ها را حل می‌کند (Rezaei.A et al,2018). به گفته ساتی AHP یکی از روش‌های MCDM برای حل مشکلات پیچیده و غیر ساختاری با ایجاد یک سلسله‌مراتب کاربردی می‌باشد . (T.L. Saaty, 1988)مفهوم اصلی AHP این است که وزن مطلوب هر تصمیم جایگزین را توسعه دهیم. بدین معنا که تنظیمات را می‌توان با استفاده از زبان طبیعی یا مقادیر عددی برای تعیین اهمیت هر ویژگی مشخص کرد. پس برای تعیین مقدار مطلوب، ابتدا هر دو عنصر با استفاده از یک مقیاس ۹ نقطه‌ای از اهمیت مقایسه خواهند شد (Z. Gungor et al,2009)این روش در ارزیابی زمانی که تصمیم‌گیرنده دارای گزینه‌ها و فاکتورهای متفاوتی است روش مفیدی است (Özdağoğlu & Özdağoğlu, 2007). این مدل یک روش جبری تصمیم‌گیری با مقیاس نسبی می‌باشد که ترکیب معیارها و لایه‌های کیفی را با معیارهای کمی ممکن می‌سازد که برای تصمیم‌گیرنده این امکان را می‌دهد فاقد از هرگونه نفوذ بر روی دو معیار تمرکز نماید (معصوم زاده، تراب زاده،۱۳۸۳: ۵). درروش AHP هرگونه تصمیم‌گیری با توجه به سلسله‌مراتب، با سطوح مختلف معیارها و جایگزینی شکل می‌گیرد سپس عناصر در سطوح مختلف به‌صورت دوبه‌دو باهم مقایسه می‌شوند (Sadeghiravesh.M.H et al, 2014). تعیین وزن جایگزین تصمیم‌گیری از طریق مجموعه‌ای از محاسبات عددی مرحله بعدی این مدل به‌منظور تعیین اولویت هر جایگزین به‌وسیله‌ی ماتریس مقایسات دوگانه است و وزن نسبی هر عنصر باید توسط عناصر با وزن بالا ضرب شود تا وزن نهایی را برای رتبه‌بندی جایگزین کند که برای هر جایگزین نمره نهایی بر مبنای معادله زیر محاسبه خواهد شد:

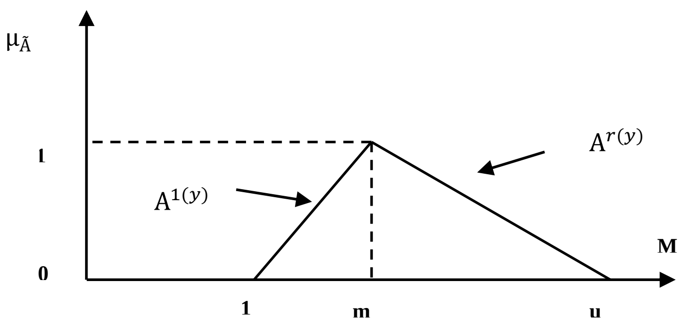
$$Pr = \sum_{k=1}^{n} . \sum_{i=1}^{m} W_k \, \square_i \, (g_{ij}) \qquad (1)$$

W_k یک ضـریب ترجیحی برای معیار W_i می‌باشـد و k ضریب ترجیح زیرمجموعه i است و g_{ij} معیار نمره مربوط به زیرمجموعه i می‌باشد(E. W. Stein et al,2009) .

محاسبه نسبت یا شاخص ناسازگاری (CR)

این محاســبه مکانیزمی اســت که به‌منظور در نظر گرفتن ثبات در تجزیه‌وتحلیل محاســبه نســبت تناقض (CR) به‌دســت‌آمده از شــاخص عدم تطابق تقســیم‌بر روی شــاخص تصــادفی که اگر این نســبت کمتر یا برابر 0.1 باشــد ســازگاری قضــاوت پذیرفته می‌شــود، درغیراینصــورت باید قضــاوت مجدداً موردبررســی قرار گیرد (Rezaei.A et al,2018). علی‌رغم محبوبیــت‌هــای مـدل AHP به دلیل ناتوانی در ترکیب ابهام‌های ذاتی وعدم وجود صـــراحت در خصــوص نگاشــت ادراک‌های تصــمیم‌گیرندگان و محققان با مقدار و اعداد دقیق، موردنقد می‌باشــد (Deng,1999). با مطرح‌شـــدن منطق فـازی در مقـابـل منطق کلاســیک به‌عنوان ابزاری توانا برای حل مســائل و چالش‌های مربوط به ســیســتم‌های پیچیده، نشــان داد که در مســائل مربوط به اســتدلال، تصمیم‌گیری و استنباط بشری قابلیت بسزایی داشته باشــد (کوره‌پزان دزفولی،۱۳۸۷). نظریه مجموعه‌های فازی و منطق فازی را اولین بار پرفســور لطفی زاده (۱۹۶۵) در رســاله‌ای به نام الگوریتم‌های فازی معرفی کرد .بر اســاس این نظریه، یک مجموعه فازی زیرمجموعه‌ای اســت که میزان عضــویت عناصــر آن در مجموعه اصــلی بین صــفر و یک باشــد .مقدار درجه عضــویت بر اساس نظرات کارشناسی و استفاده از دانش داده‌ای تعیین می‌گردد (ابراهیمی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵).

$$\mu_{\tilde{A}} \begin{cases} 0, X<1, \\ (X-1)/(m-1),\ 1 \le x \le m, \\ (u-x)/(u-m), m \le x \le u, \end{cases}$$



شکل ۲- تابع عضویت فازی مثلثی (Kilincci, O et al, 2011)

اعداد فازی به‌طور مســتقیم در ارزیابی کیفی تصــمیم‌گیرنده اســتفاده خواهند شــد و هر عدد فازی می‌تواند توســط نماد سمت چپ وراست مربوط به هر درجه عضویت داده شود (Sun, C. C, 2010).

$$\tilde{A} = (A^{1(y)}, A^{r(y)}) = (1 + (m-1)\, y,\ u + (m-u) y),\ y\ \varepsilon\ [0, 1]\ .\ (3)$$

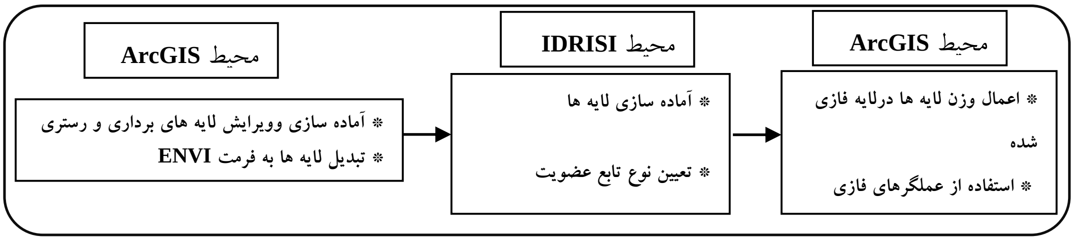
1(y)و r(y)به ترتیب بیانگر نماد سمت چپ و راست عدد فازی هستند.

با توجه به منابع مختلف فارسـی و انگلیسـی ۱۳ لایه در سه شاخص محیطی، کالبدی و اجتماعی در قالب داده‌های رسـتری و برداری از سـازمان‌ها و ادارات رسمی و معتبر همانند شهرداری و سازمان آمار اخذ شدند. پس از ویرایش و اصـلاح خطاهای احتمالی کلیه لایه‌ها به فرمت رسـتری در نرم‌افزار ArcGIS تبدیل شـدند. بعدازآن انتخاب شـیوه اسـتانداردسـازی لایه سـپس بر اسـاس منابع و مقالات محققان و پژوهشـگران، وزن هریک از لایه‌ها اوزان ۱–۹ مدل AHP و همچنین آسـتانه فازی هریک از لایه‌ها به دسـت آمدند؛ بنابراین مبنای اوزان و آسـتانه کلیه لایه‌ها مورداسـتفاده در این مقاله مبتنی بر مطالعات پیشـین بوده است. درنهایت نتیجه و خروجی نهایی در ۵ کلاس جهت نشان دادن مقدار آسـیب‌پذیری به ترتیب: آسـیب‌پذیری خیلی کم، آسـیب‌پذیری کم، آسـیب‌پذیری متوسـط، آسـیب‌پذیری زیاد، آسـیب‌پذیری خیلی زیاد مشـخص شد؛ بنابراین پس تعریف ماهیت پژوهش، شاخص‌های مؤثر آسیب‌پذیری مشخص و از هر شـاخص معیارهایی انتخاب و بر مبنای آن ماتریس تصـمیم‌گیری جهت اجرای مدل AHP تشکیل شد. بعد از بی مقیاس سـازی، محاسـبه وزن شـاخص‌ها و درنهایت پیاده‌سـازی مدل‌ها صـورت پذیرفت. برای بی مقیاس سازی لایه‌ها از دسـتور MAP Algebra در نرم‌افزار IDRISI و اسـتفاده از روش حداکثر – حداقل اسـتفاده شـد که شـامل ۲ دستور ساده زیر می‌باشد.

بزرگ‌ترین عدد پیکسل لایه/ لایه (الف)

(/ علامت جبر ب تقسیم) بزرگ‌ترین عدد پیکسل لایه/ (لایه – ۱) (ب)

در هر دو دسـتور (الف و ب)، نتیجه نقش‌هایی با دامنه بین صـفر و یک اسـت. در روش الف هرقدر که ارزش پیکسـل بزرگ‌تر باشد به سمت یک میل می‌کند. روش (ب) برعکس روش الف عمل می‌کند به عبارتی هرقدر ارزش پیکسـل لایه رسـتری کوچک‌تر باشد به سمت یک میل می‌کند. در این پژوهش نزدیکی به یک کاهش آسیب‌پذیری و بالعکس نزدیکی به صـفر نشـانه افزایش آسـیب‌پذیری اسـت. برای مثال با افزایش فاصله از گسل آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد؛ بنابراین بایسـتی از فرمول روش (ب) اسـتفاده شود و برای لایه نزدیکی به شبکه ارتباطی با کاهش فاصله از آن آسـیب‌پذیری کاهش‌یافته بنابراین فرمول شـماره (الف) بایسـتی استفاده شود تا همه لایه یکسان و استاندارد شوند. پس از اسـتانداردسـازی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4 اقدام به تشـکیل ماتریس مقایسات زوجی به روش AHPگردید و با معرفی اوزان اولیه، اوزان نهایی و نقشـه AHP با استفاده از اکستنشن AHP تهیه گردید. جهت اجرای مدل FAHP از لایه‌های رسـتری از شـیوه فازی سـازی در محیط نرم‌افزارIDRISI از طریق دسـتور Fuzzy و مشـخص نمودن نوع تابع عضـویت و میزان افزایشـی یا کاهشـی هرکدام از لایه‌ها استفاده شد. سپس در نرم‌افزارArcGIS و دستور Raster calculator هرکدام از لایه‌های فازی شـده در وزن نهایی حاصل از ماتریس مقایسات زوجی مدل AHP ضرب و باهم جمع شده، سپس خروجی نهایی نقشه حاصل از اجرای مدل FAHP به دست آمد.



شکل ۳- فرآیند کلی اجرای مدل FAHP در خصوص آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله

جدول شماره ۱- معرفی لایه‌ها و اهمیت هرکدام از آن‌ها.

شاخص	نام معیار	ویژگی و اهمیت
عوامل محیطی	فاصله از شبکه آبراهه	از عوامل تأثیرگذار و تشدیدکننده میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله هستند که هرچقدر فاصله از این شبکه‌ها بیشتر باشد آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد
	زمین‌شناسی	هراندازه کالبد زمین‌شناسی محدوده سخت‌تر باشد، توان امواج زلزله و درنتیجه میزان آسیب‌رسانی آن کم خواهد شد
	فاصله از گسل	نزدیکی به گسل موجب افزایش آسیب‌پذیری می‌شود و با دور شدن از خط گسل در هر نقطه‌ای شرایط مطلوب‌تری در خصوص کاهش خطر زلزله حاصل می‌گردد.
	ارتفاع	ارتباط با حساسیت زمین‌لرزه، ارتباط با فعالیت‌های انسانی، در ارتفاع بالا به دلیل ناپایداری خطر لرزش بیشتر می‌باشد.
	شیب	افزایش شیب موجب افزایش آسیب‌پذیری می‌شود، زلزله احتمال روانگرایی را تشدید می‌کند.
عوامل کالبدی	فاصله از شبکه ارتباطی	امداد و نجات، افزایش جابجایی، فضای باز، اخلال در آن باعث اخلال در سایر زیرساخت‌ها می‌شود، ساختار سلسله‌مراتب شبکه ارتباطی
	کاربری اراضی	سازگاری اراضی، همجواری، تراکم ساختمان‌ها، جانمایی مناسب کاربری‌های حساس، برنامه‌ریزی کاربری اراضی می‌تواند موجب افزایش ایمنی در برابر زلزله شود.
	مساحت قطعه	کاهش اندازه قطعات سازه‌ها موجب افزایش جدی آسیب‌پذیری می‌شود.
	تعداد کاربری‌های دارای مصالح باکیفیت	نوع مصالح از معیارهای مهم پایداری و کیفیت بنا می‌باشد، سازه با مصالح مقاوم و استاندارد موجب کاهش آسیب‌پذیری می‌شود و بالعکس.
	کاربری‌های دارای مصالح بی‌کیفیت	
	تعداد طبقات	افزایش تعداد طبقات احتمال تخریب و آسیب‌پذیری بیشتر (کالبدی – انسانی) خواهد شد.
عوامل اجتماعی	تراکم جمعیت	افزایش تراکم جمعیت احتمال افزایش آسیب‌پذیری را بالا می‌برد
	تراکم خانوار	ساختار خانوارها به دلیل گستردگی و پیچیدگی می‌توانند در میزان صدمات جانی تأثیرگذار باشد.

مأخذ: (مرکز مقابله با سوانح طبیعی ایران،۱۳۸۰)، (Monge, et al, 2004)، (علوی و همکاران،۱۳۹۲،۱). (پنت و پاچایوری، ۱۹۹۲؛ گمتزی و همکاران، ۲۰۱۰). (ایالو و همکاران، ۲۰۰۵؛ گرتیزنر و همکاران،۲۰۰۱). (وگروسوسکی، ۲۰۱۰؛ بای و همکاران، ۲۰۱۰). (Coburn & Spence,2003)، (قائدرحمتی و همکاران،۱۳۹۰). (Gay,2007)،(اسفندیاری وهمکاران: ۱۳۹۲). (زیاری و همکاران،۱۳۸۹)، (احدنژاد و همکاران،۱۳۹۲). (بحرینی و همکاران،۱۳۷۵). (Azizi & Akbari, 2008). (Lewis et al,2005). (عابدینی و همکاران،۱۳۹۳). (حجازی،۱۳۹۱).

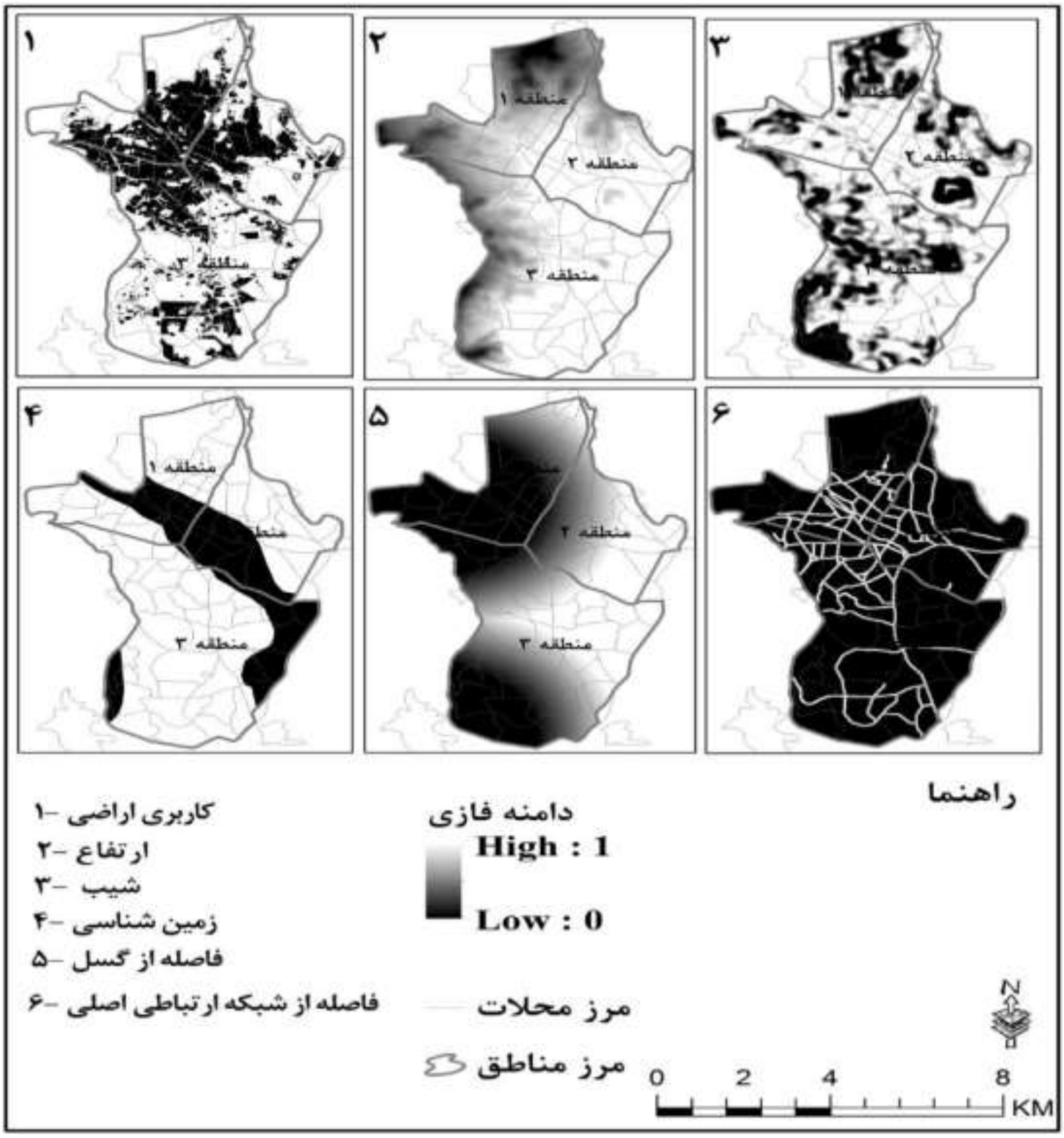
پس از اســتانداردســازی لایه‌ها و انتقال آن‌ها به مدل AHP علاوه بر تهیه نقشــه خروجی، وزن نهایی معیارها (شکل ۵) و میزان همبســتگی فضــایی معیارها نســبت به مدل AHP (شکل ٦) به دست آمد. همچنین نسبت CR به‌دست‌آمده برابر با ۰,۰۰۲۱ که کمتر از ۰,۱ می‌باشد ونشان دهنده قابل‌قبول بودن نتیجه است.

جدول ۲- فرآیند آماده‌سازی لایه‌ها جهت تبدیل به فازی

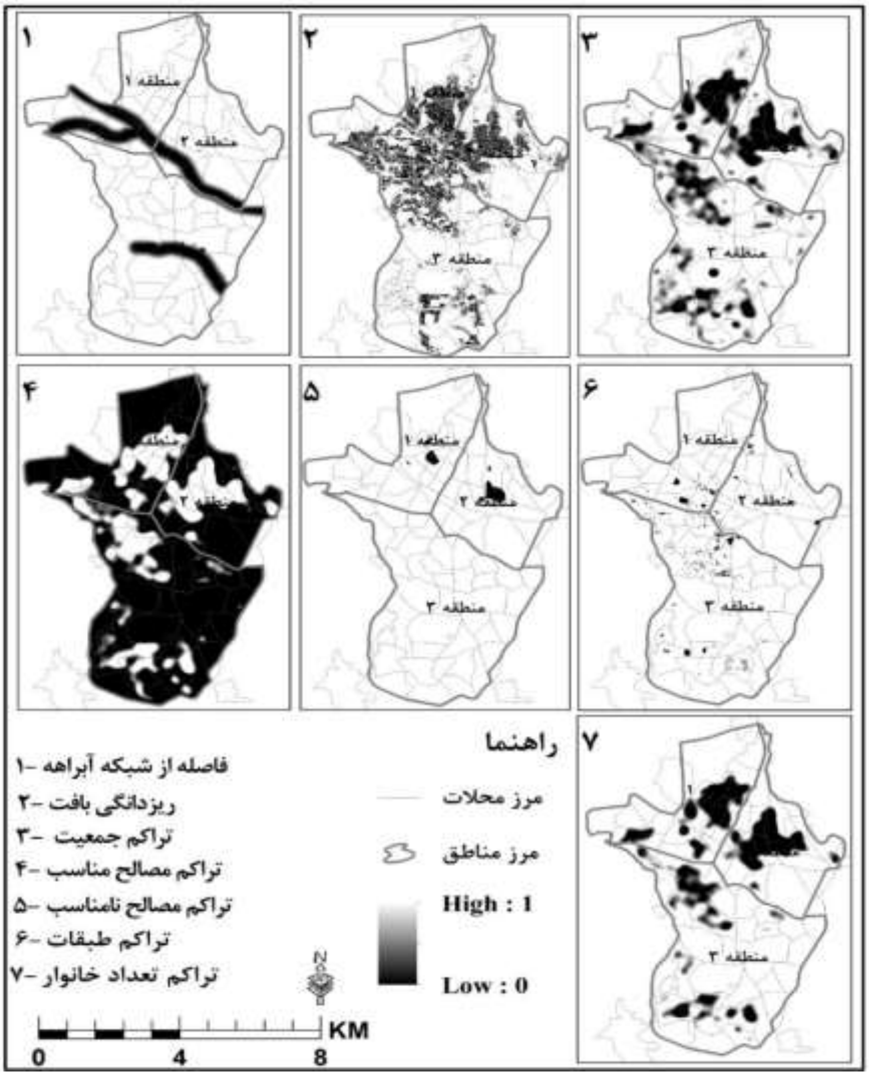
شماره نقشه	نوع تابع فازی	آستانه فازی	حد بالا و پایین	وزن نهایی AHP	وزن اولیه AHP	آماده سازی وویرایش لایه‌ها در نرم افزار Arc GIS	لایه نقشه	ردیف
(۱)	افزایشی	۱۰۱ – ۳۰۱	۰ – ۳۹۳۰ متر	۰,۱۱۷۰۵۵	٤	Euclidean distance	فاصله ازشبکه آبراهه	عوامل محیطی
(۲)	کاهشی	۳ – ۵	۱ – ٦	۰,۰۷۰٦۵۵	۷	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	زمین‌شناسی	
(۳)	افزایشی	۲۰۰۰ – ٤۰۰۰	۰ – ٦۰۳۰ متر	۰,۰۵۲۲۲۵	۹	Euclidean distance	فاصله ازگسل	
(٤)	کاهشی	۱۵۰۰ – ۱۷۰۰	۱۳۷۰ – ۱۷۲۰ متر	۰,۱۰۰۲۳۲	۵	ارتفاع (به متر)	ارتفاع	
(۵)	کاهشی	۱۰ – ۲۰	۰ – ۵۰	۰,۰۸۲۳۸۵	٦	طیف شیب به درصد	شیب	
(٦)	کاهشی	۲۰ – ٤۰	۰ – ۱۳۹۰ متر	۰,۰٦۹۹۵۷	۷	Euclidean distance	فاصله از شبکه ارتباطی	عوامل کالبدی
(۷)	افزایشی	۲ – ٤	۱ – ۵	۰,۰٦۰۱۵۵	۸	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	کاربری اراضی	
(۸)	افزایشی	۲ – ٤	۱ – ۵	۰,۰٦۹۹۵۷	۷	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	مساحت قطعه	
(۹)	افزایشی	٤۰ – ٦۰,۱	۰ – ۱٤۱ (کاربری در هکتار)	۰,۰۸٤۵۵	٦	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	تعدادکاربری های دارای مصالح با کیفیت	
(۱۰)	کاهشی	٤۰ – ٦۰,۱	۰ – ۸٦ (کاربری درهکتار)	۰,۰۸٤۵۵	٦	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	کاربری های دارای مصالح بی کیفیت	
(۱۱)	کاهشی	۲ – ٤	۰ – ۵	۰,۰۷۰۱۷۳	۷	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	تعداد طبقات	
(۱۲)	کاهشی	۱۰۰ – ۲۰۰	۰ – ٤٤٤ (نفر درهکتار)	۰,۰۵۵٦۰۹	۹	Kernel Density	تراکم جمعیت	عوامل اجتماعی

ادامه جدول ۲

شماره نقشه	نوع تابع فازی	آستانه فازی	حد بالا و پایین	وزن نهایی AHP	وزن اولیه AHP	آماده سازی وویرایش لایه‌ها در نرم افزار Arc GIS	لایه نقشه	ردیف
(۱۳)	کاهشی	۴۰ - ۶۰	۰ - ۱۱۴ (خانوار درهکتار)	۰,۰۸۲۹۰۸	۶	Kernel Density	تراکم خانوار	عوامل اجتماعی



شکل ۵- لایه‌های فازی شده ۱



شکل ٦- لایه‌های فازی شده ۲

از بعد کاربری اراضی منطقه یک به دلیل تراکم بالای کاربری‌ها بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. مرکز شهر و بخش‌هایی از جنوب در منطقه ۳ نیز شرایط نامساعدی را نشان می‌دهند. لایه ارتفاعات حاکی از آن است که بخش شرقی شهر (مناطق ۳ و ۱) بعلاوه بخش شمالی در منطقه ۱ شهرداری سنندج آسیب‌پذیری بالایی را خواهند داشت؛ اما وضعیت شیب شرایط متفاوتی را نشان می‌دهد. با فاصله گرفتن از مرکز شهر به سمت حاشیه و بخش‌های مرکزی منطقه ۳ احتمال آسیب‌پذیری بالایی را خواهد داشت. زمین‌شناسی محل نیز به ترتیب مناطق ۲، ۱ و ۳ بیشترین پهنه‌های خطرناک را نشان می‌دهد. تمام منطقه ۱ ازنظر نزدیکی به خط گسل بیشترین احتمال آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد بخش جنوبی منطقه ۳ و در منطقه ۲ حاشیه مرزی آن با منطقه ۱ شرایط نامساعدی را دربر دارد. به دلیل

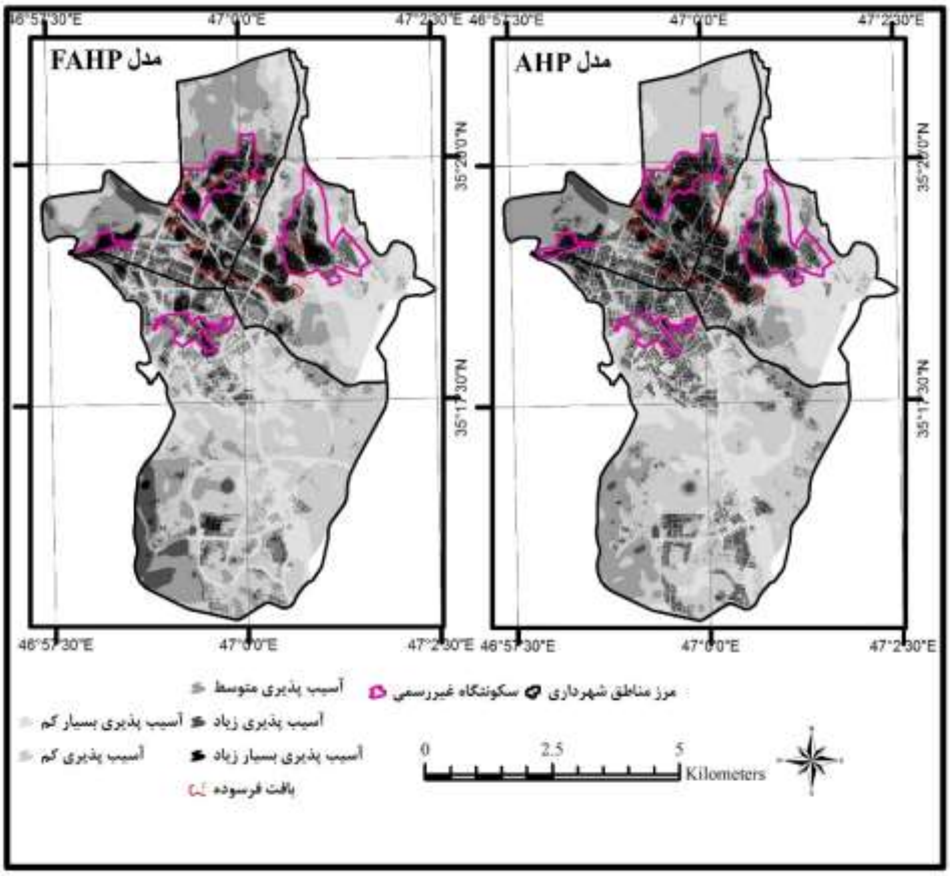
تمرکز شبکه ارتباطی بخش مرکزی شهر از این نظر وضعیت آسیب‌پذیری را کاهش می‌دهد. ازنظر فاصله از آبراهه پهنه‌های اندکی از شهر آسیب‌پذیر می‌باشد. بخش مرکزی و بخش‌های اعظمی از منطقه ۱ از نظر ریزدانگی بافت شرایط نامناسبی را نشان می‌دهد و منطقه ۳ نسبت به سایر مناطق آسیب‌پذیری کمتری را تجربه خواهد نمود. بیشترین حجم تراکم جمعیت در مناطق ۲ و ۱ متمرکز بوده (به دلیل ریزدانگی بافت و حاشیه‌نشینی) بوده که آسیب‌پذیری بالایی را به همراه خواهند داشت. بخش‌های مرکزی مناطق ۲ و ۱ و بخش جنوبی و شمال غربی منطقه ۳ از نظر به‌کارگیری مصالح مناسب شرایط خوبی را نشان می‌دهند و مرکز شهر به دلیل فرسودگی و قدمت بالای بافت شرایط نامساعدی را نشان می‌دهد؛ اما ازنظر مصالح ضعیف و کم‌دوام پهنه‌های کوچکی از مناطق ۲ و ۱ (مرکز مناطق) به ترتیب شرایط نامساعد و منطقه ۳ به دلیل نوساز بودن بافت فاقد آسیب‌پذیری از این منظر است. تراکم طبقات نیز پهنه‌هایی کوچکی را در کل مناطق نشان می‌دهد. بیشترین تراکم جمعیت در مناطق ۲ و ۱ و بخشی از شمال غرب منطقه ۳ وجود دارد.

همپوشانی فازی

عملیات همپوشانی فازی در محیط ArcGIS امکان‌پذیر است (Alois H, et al,2013). مدل‌های مبتنی بر عملیات پوشش با استفاده از وزن‌ها، در مقایسه با عملیات بر اساس منطق بولین، امکان ترکیب نقشه‌های انعطاف‌پذیرتر را فراهم می‌کند (Luis M. T. C et al, 2007). در اینجا ابتدا هرکدام از لایه‌های فازی سازی شده به‌صورت مجزا در وزن مربوط به خود در دستور Raster calculator ضرب شدند سپس نقشه‌های جدید توسط پنج عملگر فازی (SUM, GAMMA, OR, AND, PRODUCT) اجرا شدند و جواب حاصل از بهترین عملگر یعنی عملگر SUM به‌عنوان نقشه نهایی انتخاب گردیده است. تابع پوشش فازی SUM مجموع مقادیر فازی هر مجموعه را که محل سلولی متعلق به آن است اضافه می‌کند. مجموع نتیجه یک تابع ترکیبی در حال افزایش است که بر اساس تعداد معیارهای واردشده در تجزیه‌وتحلیل است(P.Pahlavani et al,2015) .

جدول شماره ۳- مقایسه برآورد میزان آسیب‌پذیری ۲ مدل AHP و FAHP

میزان آسیب‌پذیری شهر سنندج بر اساس نتیجه مدل FAHP		میزان آسیب‌پذیری شهر سنندج بر اساس نتیجه مدل AHP	
درصد	کلاس آسیب‌پذیری	درصد	کلاس آسیب‌پذیری
۲۵ .۳۸	آسیب‌پذیری خیلی کم (۱)	۰ .٦۳	آسیب‌پذیری خیلی کم (۱)
۳۰ .۷٦	آسیب‌پذیری کم (۲)	۲۵ .۸۱	آسیب‌پذیری کم (۲)
۲۵ .۱٦	آسیب‌پذیری متوسط (۳)	۵۵ .۹۸	آسیب‌پذیری متوسط (۳)
۱٤ .٦	آسیب‌پذیری زیاد (٤)	۱۵ .۸۵	آسیب‌پذیری زیاد (٤)
٤ .۱	آسیب‌پذیری خیلی زیاد (۵)	۱ .۷۳	آسیب‌پذیری خیلی زیاد (۵)



شکل شماره ۷- نقشه حاصل از مدل FAHP

بر اساس نتایج حاصل ازهر دو مدل AHP و FAHP بیشتر مناطق با آسیب‌پذیری بالا ازلحاظ کالبدی دارای ویژگی‌هایی نامطلوبی چون ریزدانگی، عدم کیفیت مصالح، فرسودگی کاربری‌ها، تراکم بالای کاربری‌ها و از منظر اجتماعی دارای تراکم بالای جمعیت می‌باشند که با بافت فرسوده و محلات حاشیه‌نشین مطابقت دارد؛ اما مقایسه ۲ مدل بر اساس شکل شماره ۸ حاکی از دقت بیشتر مدل FAHP دارد.

٤- بحث و نتیجه‌گیری

شهر سنندج با مرکزیت استان کردستان و مساحت و تراکم بالای جمعیت، افزایش روند حاشیه‌نشینی، عدم رعایت اصول مهندسی در ساخت‌وسازها و وجود بافت‌های فرسوده شهری با تراکم بالا ازجمله شهرهای آسیب‌پذیر در برابر زلزله است. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، به‌رغم استفاده روش AHP از متغیرهای کمی و کیفی، این روش توانایی مدل‌سازی عدم قطعیت[1] در خصوص قضاوت تصمیم‌گیرندگان را ندارد. اغلب روش‌های بکار رفته در

---

1 Uncertainty

مقالات و تحقیقات صورت گرفته‌شده با استفاده از یک مدل (غالباً مدل AHPیا ANP) استفاده‌شده است. به‌علاوه مقایسه تطبیقی بین دو یا چند مدل بل اخص مدل AHP با یک مدل عدم قطعیت همانند فازی و ترکیب آن با مدل AHP صورت نگرفته است؛ اما برخلاف روش فوق، مدل FAHP قابلیت فرموله نمودن عدم قطعیت‌های مربوط به پژوهش حاضر را دارا است. همچنین از توانایی‌های دیگر مدل Fuzzy – AHP در این پژوهش، بهره‌گیری از طیف‌های مختلف از طریق روش‌های غیرفازی سازی[1] بر مبنای مسئله موردمطالعه از حداقل گیری تا حداکثر گیری است و این روش عدم اطمینان در رتبه‌بندی عملکردها و تصمیمات موجود در روش AHP را از بین برده؛ همچنین در منطق فازی ابهامات موجود در قضاوت فرموله شده و به زبان ریاضی بیان‌شده است؛ بنابراین روش FAHP قابلیت اطمینان بیشتری در تعیین آسیب‌پذیری در اینجا بررسی شهر سنندج در برابر زلزله دارد؛ زیرا در تعیین کاربری‌های آسیب‌پذیر در فضای شهر با استفاده از معیارهای مختلف نمی‌توان به‌صورت قطعی مناطق یا محلاتی را در طیف خاصی قرارداد که با استفاده از این مدل می‌توان تحلیلی بهتر با انعطاف‌پذیری بیشتر ارائه نمود. با توجه به نتایج نقشه مدل و جدول شماره ۲، در منطقه ۱ شهر سنندج محلاتی همچون قطارچیان، تازه آباد، حاجی آباد، بعثت، تپه شیخ صادق، جورآباد و در منطقه ۲ محلات عباس‌آباد، گلشن، پیرمحمد و درنهایت در منطقه ۳ مبارک آباد، کلکه جار، ویلاشهروشهرک بهاران، دارای آسیب‌پذیری خیلی زیاد هستند. بطور کلی به ترتیب مناطق ۱، ۲ و ۳ بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند که با بافت فرسوده و حاشیه نیشن شهر انطباق دارند؛ بنابراین مهمترین پیشنهاد این پژوهش برنامه‌ریزی جامع و عملیات های عمرانی همه جانبه مناطق حاشیه نشین و بافت فرسوده به صورت اولویت دار جهت مقابله با زلزله احتمالی می‌باشد.

کتابنامه

ابراهیم‌زاده، عیسی؛ کاشفی، دیمن و حسینی، احمد؛ ۱۳۹۳. ارزیابی آسیب‌پذیری محله‌های شهری در برابر زلزله (نمونه موردی: شهر پیرانشهر). فصلنامه علمی – پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا). سال پنجم، شماره اول، پیاپی ١٦. بهار ١٣٩٤. صفحات ١- ٢٦.

احدنژاد روشتی، محسن؛ روستایی، شهریور و کاملی فر، محمدجواد؛١٣٩٤. ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه معابر شهری در برابر با رویکرد مدیریت بحران (مطالعه موردی: منطقه ۱ شهر تبریز). فصلنامه علمی–پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. دوره ٢٤. شماره ٩٥. پاییز ٩٤.

انتظاری نجف‌آبادی، مژگان؛ یوسفی، فاطمه؛١٣٩٢. ارزیابی تأثیر عوامل ژئومورفولوژی در توسعه شهرنشینی شهر سنندج. مجله علمی–پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)، سال سوم. شماره چهارم، پیاپی ١١. زمستان ١٣٩٢. صفحات ٧٧ – ٩٤.

1 Defuzzification

آبسالان، علی؛ کنگی، عباس؛ ۱۳۹۳. گزارش تحقیقاتی مجموعه دستاوردهای تحقیقاتی-کاربردی سامانه مدیریت بحران زلزله شهر هوشمند مشهد. سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری مشهد. شماره نشر ۱۰۱.

بهزاد افشار، کتایون؛ اکبری، پرویز؛۱۳۹٦. ارزیابی متغیرهای کالبدی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بناهای شهری با استفاده از مدل TOPSIS (مطالعه موردی: ناحیه منفصل شهری باباریز سنندج). فصلنامه علمی – پژوهشی مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی. دوره ۱۲، شماره ٤. پیاپی ٤۱. زمستان ۱۳۹٦. صفحات ۸۵۷ – ۸۷۳.

پناهی کایوشه، محمدحسین؛ متشرعی، آرش؛۱۳۹۲. تحلیل زمین‌لرزه‌ای به روش قطعی در ناحیه سنندج استان کردستان، هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. ۷ تا ۹ آبان. دانشگاه شهید بهشتی.

حبیبی، کیومرث؛ جوانمردی، کومار،۱۳۹۱. تحلیل ناپایداری بافت‌های شهری و پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله با استفاده از GIS&AHP. نمونه موردی: بخشی از هسته مرکزی شهر سنندج. نشریه معماری و شهرسازی آرمان‌شهر شماره ۱۱. پاییز و زمستان ۹۲.

خاکپور، براتعلی؛ حیاتی، سلمان؛ کاظمی بی‌نیاز، مهدی وربانی ابوالفضلی، غزاله؛۱۳۹۲. مقایسه تطبیقی-تحلیلی میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری در برابر زلزله با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی و فازی (نمونه موردی: شهر لامرد). فصلنامه آمایش محیط. شماره ۲۲. صفحات ۳۸-۲۱.

خالق پناه، کمال؛ نیری، هادی؛ کرمی، محمدرضا و احمدی، خبات؛۱۳۹٤. پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله با استفاده از دو مدل تحلیل سلسله مراتبی و مدل تاپسیس. نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی. سال ۲۰. شماره ۵۷. پاییز ۱۳۹۵ صفحات ۲۹٤-۲۷۷.

روستایی، شهریور؛ معبودی، محمدتقی؛ ۱۳۹۵. تحلیل فضایی آسیب‌پذیری اجتماعی مناطق شهری در مقابل زلزله با استفاده از مدل SVI (نمونه موردی: منطقه ۲ شهرداری تبریز). فصلنامه مطالعات برنامه‌ریزی شهری، سال سوم. شماره ۱۱. پاییز ۱۳۹٤. صفحات ۱۰۵ – ۱۲٦.

زمردیان، محمدجعفر؛۱۳۸۱. ژئومورفولوژی ایران. جلد اول. مشهد. انتشارات دانشگاه فردوسی.

شهابی، هیمن؛ قلیزاده، محمدحسین و نیری، هادی؛ ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با روش تحلیل چند معیاره فضایی. جغرافیا و توسعه. شماره ۲۱. صفحات ٦۵-۸۰.

شهین فر، حمید؛۱۳۹۳. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه صوفیان با استفاده از مدل AHP. فصلنامه علمی-پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست. سال نهم، شماره ۳۱. تابستان ۱۳۹٤.

شیعه، اسماعیل؛ حبیبی، کیومرث وترابی، کمال؛۱۳۸۹. بررسی آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش سلسله مراتبی معکوس و GIS(مطالعه موردی: منطقه ٦ تهران). چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام. صفحات ۱۲ – ۱.

شیعه، اسماعیل؛۱۳۸۵. کتاب مقدمه‌ای بر مبانی برنامه‌ریزی شهری. ناشر دانشگاه علم و صنعت ایران. تعداد صفحات ۲۲٦.

علوی، سیدعلی؛ حسینی، سیدمصطفی؛ بهرامی، فریبا وعاشورلو، مهراب؛۱۳۹٤. ارزیابی میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری با استفاده از ANP و GIS (مطالعه موردی: شهر سمیرم). فصلنامه علمی – پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. دوره ۲۵. شماره ۱۰۰.

غلامی، یونس؛ حیاتی، سلمان؛ قنبری، محمد و اسماعیلی، آسیه؛۱۳۹٤. پیش‌بینی فضاهای آسیب‌پذیر شهر مشهد هنگام وقوع زلزله. پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری. دوره ۳. شماره ۱. بهار ۱۳۹٤. صفحات ٦٧-٥٥.

فرج زاده اصل، منوچهر؛ بصیرت، فروغ؛۱۳۸۵. پهنه‌بندی حساسیت تشکیلات زمین‌شناسی در مقابل زلزله منطقه شیراز. پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۵۵. صفحات ۵۹ – ۷۲.

قبادی، محمدحسین ،اصغری، ژیلا و گودرزی، ذبیح ا... ؛ ۱۳۹۰. بررسی پتانسیل لرزه‌خیزی شهرستان سنندج. پنجمین همایش ملّی زمین‌شناسی. دانشگاه پیام نور استان زنجان.

قنبری، ابوالفضل؛ سالکی، محمدعلی و قاسمی، معصومه؛۱۳۹۲. پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهرها در برابر خطر زلزله (نمونه موردی: شهر تبریز). مجله جغرافیا و مخاطرات طبیعی. شماره ۵. صفحات ۲۱ – ۳۵.

کرمی، محمدرضا؛ امیریان، سهراب؛۱۳۹۷. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهری ناشی از زلزله با استفاده از مدل Fuzzy – AHP (مطالعه موردی: شهر تبریز). نشریه علمی – پژوهشی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی. سال سوم، شماره ٦. پیاپی ۱۰. تابستان ۱۳۹۷. صفحات ۱۲٤-۱۱۰.

کریمی کردآبادی، مرتضی؛ نجفی، اسماعیل؛۱۳۹٤. ارزیابی خطر زلزله با استفاده از مدل ترکیبی FUZZY AHPدر امنیت شهری (مطالعه موردی: منطقه یک کلان‌شهر تهران). مجله پژوهش و برنامه‌ریزی شهری. سال ششم. شماره بیستم. بهار ۱۳۹٤. صفحات ۱۷-۳٤.

کوره‌پزان دزفولی، امین؛۱۳۸۷. اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌های مسائل مهندسی آب. جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر). ۱۳ مهر. ۱۳۸۷.

محمدی احمدیانی، جمال؛ صحرائیان، زهرا و خسروی، فرامرز؛۱۳۸۹. نقش عوامل مؤثر در آسیب‌پذیری کالبدی شهر جهرم در برابر زلزله. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. جلد ۱٤. شماره ۱۷. تابستان ۱۳۸۹. صفحات ۱۲۱ – ۱٤۳.

محمدی، علیرضا، جاوید مغوان، بهمن؛ ۱۳۹۵. سنجش میزان آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های غیررسمی در برابر خطر وقوع زمین‌لرزه با استفاده از GIS. مورد پژوهش: محله زیر نهر تراب شهر پارس‌آباد. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. سال سوم. شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵. صفحات ٦٤-٤۱.

مرکز آمار ایران؛ ۱۳۹۵. سرشماری نفوس و مسکن شهر سنندج سال ۱۳۹۸.

معصوم زاده، سیدمحسن؛ تراب زاده، اقدس؛۱۳۸۳. رتبه‌بندی تولیدات صنعتی کشور. فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی. شماره ۳۰. بهار ۱۳۹۳. ٦۷ – ۸۱.

ملکی، امجد؛۱۳۸۵. پهنه‌بندی زمین‌لرزه و اولویت‌بندی مساکن استان کردستان. پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۵۹. صفحات ۱۱۵-۱۲٤.

ملکی، سعید؛ امانپور، سعید؛ صفایی پور، مسعود؛ پورموسوی، سیدنادر و مودت، الیاس؛ ۱۳۹٦. ارزیابی طیف تاب‌آوری کالبدی شـهرها در برابر زلزله با اسـتفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی (نمونه موردی: شهر ایلام). نشریه علمی-پژوهشی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی. سال دوم، شماره ۱. پیاپی ۵. بهار ۱۳۹٦.

مهدوی، داوود؛ هزاریان، الهام؛ ۱۳۹٦. ارزیابی آسـیب‌پذیری کالبدی سـکونتگاه‌های روسـتایی در برابر زلزله. مطالعه موردی روسـتاهای شـهرسـتان یزد. نشریه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی. سال دوم. شماره ٤(سری جدید). پیاپی ۸.زمستان ۱۳۹٦. صفحات۲۷ -٤۵.

مهدوی نژاد، محمدجواد، جوانرودی، کاوان؛۱۳۹۱. بررسـی آسـیب‌پذیری ناشـی از زلزله در شبکه‌های ارتباطی تهران بزرگ مطالعه موردی **:**خیابان ولی‌عصر (عج) شمالی تا چهارراه پارک‌وی. فصلنامه مدیریت بحران. شماره اول.

نگارش، حسـین؛۱۳۸۲. کاربرد ژئومورفولوژی در مکان گزینی شهرها و پیامدهای آن»، نشریه جغرافیا و توسعه. بهار و تابستان ۱۳۸۲. دوره ۱. صفحات ۱۳۳ - ۱۵۰.

نگارش، حسـین؛۱۳۸٤. زلزله، شـهرها و گسل‌ها. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی دوره ۳۷. شماره ۵۲. صفحات ۹۳ - ۱۱۰.

نیری، هادی؛ کرمی، محمدرضـا؛ ۱۳۹۵. امکان‌سنجی آسیب‌پذیری شهر سنندج در برابر زلزله با استفاده از مدل متوسط وزنی مرتب‌شـده (OWA). نشـریه مطالعات نواحی شهری دانشگاه شهید باهنر کرمان. سال سوم. شماره ۱. پیاپی ٦. بهار ۱۳۹۵.

ولیزاده کامران، خلیل؛ ۱۳۸۰. پهنه‌بندی خطر زلزله در شهرستان تبریز با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS. نشریه فضای جغرافیایی. شماره ٤. صفحات ٦٦ - ٤۹.

Alexander, D., 1993. Natural Disaster. London.

Andisheh, K., 2007. Seismic Hazard Assessment of Sanandaj City of Iran Based on Psha”, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering,June 25-28, 2007Paper No. 157.

Bosher, L., 2008. Hazards and the Built Environment:Attaining Built-in Resilience”, Taylor & Francis Routledge.

D. Smith,K.; N. Brune,J.; dePolo,D.; K. Savage,M.; Anooshehpoor,R.; F. Sheehan,A., 2001. The 1992 Little Skull Mountain Earthquake Sequence,Southern Nevada Test Site” Geologic and Geophysical Characterization Studies of Yucca Mountain, Nevada. https://doi: 10.1785/0120000089

Deng, H., 1999. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparisons, International Journal of Approximate Reasoning 21:231–215. https://doi.org/10.1016/S0888-613X(99)00025-0

Ericson, Clifton.A., 2005. Hazard Analysis Techniques for System Safety. Published by John Wiley & Sons, Inc. https://doi:10.1002/0471739421

Gungor, Z., Serhadlioglu, G., Erhan Kesen, S., 2009. A fuzzy AHP approach to personnel selection problem,p.p 5-7, Applied Soft Computing, vol. 9, pp. 641-646, September 2009. http://doi: 10.1016/j.asoc.2008.09.003

han, F. T. & Kumar, N., 2007. Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach.Omega,35(4), 417-431. https:// doi.org/ 10.1016 /j.omega. 2005.08.004

Hofmann,A. Sarka Hoskova, M. and Talhofer,V., 2013. Usage of Fuzzy Spatial Theory for Modelling of Terrain Passability, Advances in Fuzzy Systems Volume 2013,Article ID 506406, 7 pages. https://doi.org/10.1155/2013/506406

Ian Lin, M., Duen Lee, Y., Neng Ho,T., 2011. Applying integrated DEA/AHP to evaluate the economic performance of local governments in China, European Journal of Operational Research 209 (2011) 129–140. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.006

Kilincci, O. & Onal, S. A., 2011. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company.Expert systems with Applications,38(8), 9656-9664. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.159

L. Saaty ,T., 1988. What is the analytic hierarchy process? Springer Berlin Heidelberg, pp. 109-121. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-83555-1_5

Lan Davis, Pergamon Press,Oxford. Michigan University.

Lantada, N. Pujades, L. & Barbat, A., 2008. Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison, Nat Hazards 51. https://doi: 10.1007/s11069-007-9212-4

Lewis, J., 1981. Mitigation Preparedness Measures, In Disaster And The Small Dwelling, Ed. https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1979.tb00146.x

Li, F., Wang, R., Paulussen, J. & et al., 2005. Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing, china, J. Land scape and urban planning. 2005, 72. 325-336. https://doi: 10.1016/j.landurbplan.2004.04.002

M. T. Carvalho,L., S. Ribeiro,M., T. de Oliveira,L., C. A. Oliveira,T., N. Louzada,J., R. S. Scolforo,J., D. Oliveira,A., 2007.Weighted Overlay, Fuzzy Logic and Neural Networks for Estimating Vegetation Vulnerability within the Ecological Economical Zoning of Minas Gerais, Brazil,IX Brazilian Symposium on GeoInformatics, Campos do Jordão, Brazil, November 25-28, 2007, INPE, p. 171-182.

Özdağoğlu,A., Özdağoğlu, G., 2007. Comparison Of Ahp And Fuzzy Ahp For The Multi-Criteria Decision Making Processes With Linguistic Evaluations, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Yıl: 6 Sayı:11Bahar2007/1 s. 65-85.

Pahlavani, P., Abbaspour, R.A., Zare Zadiny, A., 2015. A Different Web-Based Geocoding Service Using Fuzzy Techniques, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W5, 2015 International Conference on Sensors & Models in Remote Sensing & Photogrammetry, 23–25 Nov 2015, Kish Island, Iran. https://doi: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-571-2015

Rezaei, A.,Tahsili, S., 2018. Urban Vulnerability Assessment Using AHP”, Hindawi, Advances in Civil Engineering,Volume 2018, Article ID 2018601, 20 pages. https:// doi.org/ 10.1155 /2018/2018601

Sadeghiravesh, M.H., Zehtabian, Gh.R., Khosravi, H., 2014. Application of AHP and ELECTRE models for a ssessment of de-desertificationa lternatives, Received:20 July 2014; Received in revised form:8 September 2014; Accepted:21 September 2014, Desert-192(2014)141-153.

Stein, E. and Norita,A., 2009. Using the analytical hierarchy process (AHP) to construct a measure of the magnitude of consequent of moral intensity, Journal of Business Ethics,vol. 89, no. 3, pp. 391–407, 2009. https://doi: 10.1007/s10551-008-0006-8

WDI., 2004. Natural Disaster Hotspost: A Global Risk Analysis(the world Bank), WDI for some contrise.